

STANOVENÍ TEPELNÉ BILANCE TLAKOVÝCH LICÍCH FOREM

TEMPERATURE REGIME OF DIE-CASTING MOULD

MARTIN DRÁBEK¹, IVA NOVÁKOVÁ²

ABSTRACT: This article contains basic information about giving temperature balance of die-casting mould during die casting. The experimental measurement was made including interpretation of the effects of single parameters (temperature of melt, temperature of die-casting mould's face side, temperature of die-casting mould's surface and period of casting cycle). This measurement should help to imagine the influence of single parameters and optimize problems with giving the temperature balance of die casting mould.

ÚVOD

Jedním ze zásadních problémů slévárenské teorie i praxe při výrobě vysokotlakých odlitků jsou tepelné poměry mezi odlitkem-formou, resp. odlitkem-formou-strojem a okolím. Tyto poměry jsou důležitým faktorem, který ovlivňuje teplotní pole odlitku i formy a působí na strukturu a kvalitu odlitku. Charakter teplotního pole závisí především na tepelně fyzikálních vlastnostech odlévaného materiálu a formy, ale také na temperačním systému formy, charakteru nátěru líce formy atd. Všechny tyto faktory ovlivňují čas a průběh tuhnutí odlitku v tlakové formě. Při výrobě těchto odlitků je rozhodující správná konstrukce formy včetně volby temperačního systému. Chyby vzniklé při konstrukci forem, které se zjistí teprve při liti zkušebních vzorků se velmi špatně napravují. Pro správnou konstrukci forem existují určité zásady. V dnešní době je nepostradatelným pomocníkem také počítačová simulace.

Při konstrukci forem pro tlakové lití je důležitá: správná volba vtokového systému, tvar dělicí roviny, vhodný systém odvodu všech částí formy, správné rozmístění vyhazovačů, atd. Z tepelného hlediska je velmi důležité správné řešení temperačního systému, tj. správné rozmístění a dimenzování kanálů všech částí formy.

V současné době se této problematice věnuje Katedra strojírenské technologie, FS-TU v Liberci.

TEPELNÉ POMĚRY V SYSTÉMU ODLITEK-TLAKOVÁ FORMA

Tepelné poměry mezi odlitkem a tlakovou formou souvisí s přísným dodržováním optimální teploty povrchů jednotlivých částí její dutiny. To je důležitým předpokladem výroby jakostních odlitků. Při odlévání slitiny do formy s nedostačující teplotou líce nastává předčasné snížení teploty slitiny, což může způsobovat různé vady odlitků (nedolití, vnitřní prnutí atd.).

Teplota líce formy závisí na odlévaném materiálu, na poměru objemu odlitku k jeho povrchu, na době trvání cyklu tlakového lití, na materiálu formy, způsobu temperování formy, použitím ochranného nástřiku líce formy, atd.. Teplota líce formy při liti slitin Al se zpravidla pohybuje cca 200°C. Dodržováním optimálních teplot líce formy v úzkém rozmezí je nutné i pro dodržení správných rozměrových tolerancí odlitků. Správnou teplotu tlakové licí formy v cyklu tuhnutí a chladnutí zajišťuje tzv. temperační systém. Teplo z tuhnoucího odlitku přechází do formy. Z formy je část tepla odvedena prouděním a sáláním do okolí, vedením do rámu stroje, část je odvedena temperačním systémem a velká část se spotřebovává na odpaření ochranného nástřiku líce formy.

¹ Ing. Martin Drábek – TU v Liberci, katedra strojírenské technologie, Liberec, ČR

² Ing. Iva Nováková – TU v Liberci, katedra strojírenské technologie, Liberec, ČR

Tento proces, však lze ještě takto upřesnit na další fáze, které během výrobního cyklu probíhají současně:

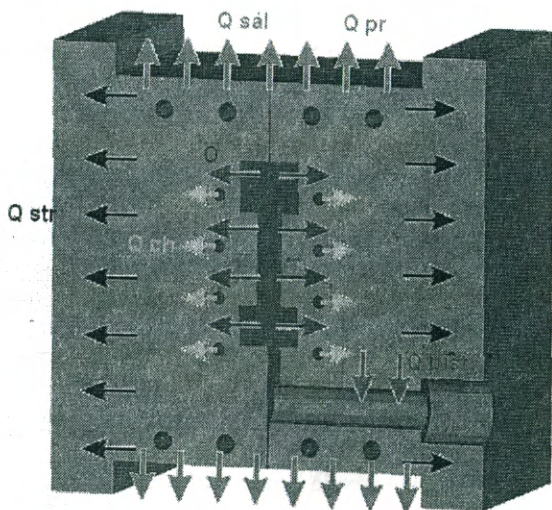
- přestup tepla z odlévaného materiálu přes vrstvu nástřiku do lící formy,
- přestup tepla z formy do temperačního systému formy,
- přestup tepla z formy do okolí a rámu stroje,

Značný význam má část tepla odváděná z tuhnoucího odlitku, která se spotřebovává na odpaření kapalně fáze nástřiku nebo nátěru lící formy.

Přestup tepla z odlitku do formy je závislý na lící teplotě odlévaného materiálu a na materiálu formy, tloušťce stěny odlitku, ale také na době styku taveniny s formou.

Veškeré úvahy o tepelné bilanci tlakové lící formy vycházejí z těchto předpokladů a zjednodušení:

- tlaková lící forma tvoří uzavřený systém v tepelné rovnováze
- tepelné toky a teploty částí formy jsou časově konstantní,
- kolísání teploty povrchu dutiny formy během lícího cyklu se zanedbává,
- jako teplota povrchu dutiny formy se považuje střední hodnota teplotního maxima a minima během lícího cyklu,
- jako teplota temperační kapaliny se považuje střední hodnota ze vstupní a výstupní teploty,



Obr.1 Schéma tlakové lící formy s vyznačením tepelné bilance

$$Q = Q_{sal} + Q_{pr} + Q_{ch} + Q_{str} + Q_{pist} + Q_{on} \quad (1)$$

kde Q – celkové teplo odlitku [J],

Q_{sal} – teplo odvedené do okolí sáláním [J],

Q_{pr} – teplo odvedené do okolí prouděním [J],

Q_{str} – teplo odvedené upevňovací deskou a rámem stroje [J],

Q_{ch} – teplo odvedené chladícím systémem [J],

Q_{on} – teplo odvedené při odpařování kapalně fáze nástřiku formy [J],

Q_{pist} – teplo odvedené pístem stroje [J].

ROVNICE PRO VÝPOČET TEPELNÉ BILANCE TLAKOVÉ FORMY

1. Množství tepla uvolněné tuhnoucí taveninou při tlakovém lití

Při tuhnutí odlitku musí tavenina uvolnit jednotlivé složky tepelné energie (tepla). Lze říci, že celkové teplo odlitku je součtem tepel jednotlivých složek a lze psát:

$$Q = Q_{př} + Q_{kr} + Q_{tch} + Q_{tř} \quad (2)$$

kde $Q_{př}$ – teplo přehřátí taveniny [J],

Q_{kr} – teplo krystalizační [J],

Q_{tch} – teplo chladnutí odlitku [J],

$Q_{tř}$ – teplo tření od kinetické energie pístu [J].

Množství tepla od tření pístu a kinetické energie taveniny je nepatrné a lze ho zanedbat.

a) množství tepla vzniklého přehřátím taveniny $Q_{př}$ lze stanovit:

$$Q_{př} = m \cdot c_L \cdot (T_{lití} - T_{kr}) \quad (3)$$

kde m – hmotnost taveniny [kg],

c_L – měrná tepelná kapacita taveniny [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

$T_{lití}$ – teplota lití [K],

T_{kr} – teplota krystalizace taveniny [K].

b) množství tepla uvolněného taveninou při její krystalizaci Q_{kr} je závislé na latentním krystalizačním teple a množství taveniny:

$$Q_{kr} = m \cdot L_{kr} \quad (4)$$

kde L_{kr} – latentní krystalizační teplo taveniny [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$].

c) množství tepla uvolněné při chladnutí odlitku Q_{tch} lze stanovit:

$$Q_{tch} = m \cdot c_S \cdot (T_{kr} - T_{ok}) \quad (5)$$

kde c_S – měrná tepelná kapacita materiálu v tuhém stavu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

T_{ok} – teplota okolí [K].

Výše uvedená část tepelné bilance naznačuje základní zákonitosti fyzikálně-tepelného popisu uvolňování tepla z tuhnoucí taveniny.

2. teplo odlitku předané prostřednictvím formy

Dále lze předpokládat, že teplo odlitku Q je předáno slévárenské formě, která ho dále předává do svého okolí, jak naznačuje rovnice (1), tj. do temperačního systému, do rámu stroje, sáláním a prouděním do okolní atmosféry.

a) množství tepla předaného formou do temperačního systému lze vyjádřit Newtonovým vztahem:

$$Q_{ch} = \alpha_t \cdot S_k \cdot (T_{spd} - T_t) \cdot t_{cyklu} \quad (6)$$

kde S_k – teplosměnný povrch temperačního kanálu, který závisí na obvodu kanálu a jeho délce $[m^2]$,

α_t – součinitel přestupu tepla mezi povrchem tvarové dutiny formy a temperačním médiem $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,

T_{spd} – střední teplota dutiny formy $[K]$,

T_t – střední teplota temperačního média $[K]$.

Součinitel přestupu tepla α_t je závislý na rychlosti proudění temperačního média (laminární nebo turbulentní) a na součiniteli tepelné vodivosti a na tvaru a rozměrech temperačního kanálu. Lze ho stanovit na základě Reynoldsova a Prandtlova podobnostního čísla:

$$\alpha_k = 0,0235 \cdot (R_e^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot P_r^{0,3} - 0,8) \cdot \frac{\lambda_t}{d} \quad (7)$$

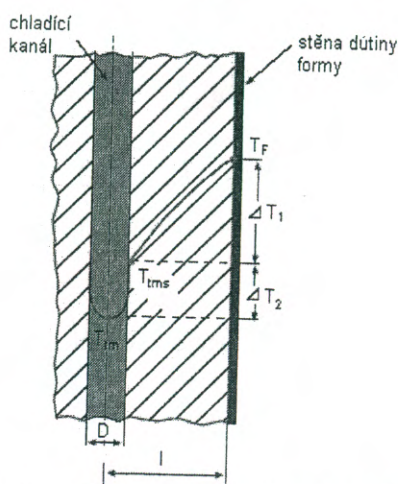
kde R_e – Reynoldsovo číslo $[-]$,

P_r – Prandtlovo číslo $[-]$,

λ_t – součinitel tepelné vodivosti temperační kapaliny $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,

d – hydraulický rozměr temperačního kanálu $[m]$.

Na obr.2 je znázorněn příčný řez tlakovou licí formou s temperačním kanálem $\varnothing D$ umístěného ve vzdálenosti l od líce formy a s vyznačením teplot ve formě a v temperačním kanálu během procesu chlazení. V oblasti materiálu formy dochází především k výměně tepla vedením, pro oblast temperačního kanálu je charakteristická výměna tepla prouděním. Teplota licí formy je T_F a teplota povrchu temperačního kanálu je T_{ms} a teplota temperačního média v kanálu je T_m . Z obrázku jsou též patrné teplotní gradienty $(\Delta T_1 = T_F - T_{ms})$ a $(\Delta T_2 = T_{ms} - T_m)$.



Obr.2 Schéma rozložení teplot v temperačním kanále ve slévárenské formě

Jak je obecně známo, temperačním systémem se rozumí systém kanálů, popř. dutin, umožňujících přestup tepla z tělesa formy do temperační kapaliny. Nesprávné navržení tohoto systému může mít za následky: nedosažení požadované kvality odlitků, dlouhou dobu licího cyklu, nestejnou teplotu jednotlivých částí formy, dlouhou rozběhovou fází dosažení stabilního teplotního stavu formy, atd.. Je snahou navrhnout temperační systém tak, aby teplo z formy bylo odváděno temperačním systémem rovnoměrně a co nejrychleji. Potom tepelné namáhání formy je minimální, její tepelné toky jsou usměrněny s minimálními teplotními gradienty po celé ploše tvarové dutiny. Nevhodně navržený temperační systém naopak způsobuje nesprávné rozložení teplotních polí ve formě a nárůst nepříznivých teplotních gradientů. K udržování správné pracovní teploty lící formy slouží nejrozumnější termoregulační zařízení, která jsou nejčastěji opatřena zubovým čerpadlem. Toto čerpadlo zajišťuje dopravu temperačního média do tlakové formy.

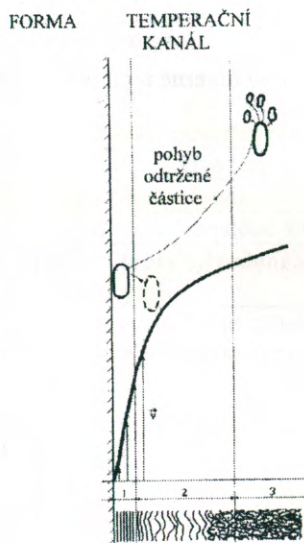
Při tlakovém lití je nutná i správná volba temperačního média. Vhodné jsou speciální oleje s vysokým viskozním tokem, odolností proti stárnutí, vysokou oxidační a termickou stabilitou, nízkým tlakem par, dobrou ochranou před korozi a vysokým součinitelem přestupu tepla. V tab. 1 jsou uvedeny informativní hodnoty temperační kapaliny.

Tab. 1 Přehled hodnot temperační kapaliny tlakových forem

Teplota (°C)	0	20	40	100	150	200	250	300	340
Hustota (kg/m ³)	876	863	850	811	778	746	713	681	655
Kinematická viskozita (mm ² s ⁻¹)	289	76	30	5	2,2	1,3	0,85	0,62	0,52
Měrná tepelná kapacita (kJ/kgK)	1,809	1,882	1,954	2,173	2,355	2,538	2,72	2,902	3,048
Tepelná vodivost (W/mK)	0,136	0,134	0,133	0,128	0,125	0,121	0,118	0,114	0,111
Prandtlovo číslo	3375	919	375	69	32	20	14	11	9
Tlak par (mbar)	-	-	-	-	-	5	26	100	260

Pozn.: Uvedené vlastnosti jsou charakteristické pro současnou produkci a mají pouze informativní charakter.

Při styku chladného temperačního média se stěnou temperačního kanálu dochází vlivem tepla z formy k ohřívání tenké vrstvy kapaliny v temperačním kanálu a tím k jejímu přirozenému proudění. Současně vliv vedlejších účinků na zvýšení proudění temperační kapaliny způsobuje její nucenou konvekci. To vede ke značnému zvýšení výměny tepla. Na obr. 3 je uvedeno schéma proudění v kanálu temperačního systému.



Obr. 3 Schéma dějů v blízkosti stěny kanálu při turbulentním proudění

- 1 - oblast převážně laminárního proudění
- 2 - přechodová oblast
- 3 - oblast turbulentního proudění

Při temperaturaci tlakové formy je důležité chování proudící kapaliny. Při laminárním proudění se částice kapaliny pohybují po rovnoběžných drahách a vrstvy se navzájem nemísí. Na obr. 3 jsou uvedeny tři odlišné oblasti. Blízko stěny kanálu se uskutečňuje laminární proudění. V praxi však není laminární vrstva čistě laminární, neboť částice s malou rychlostí se odtrhují od stěny a pohybují se do středních partií kanálu, kde je oblast turbulence. Pro turbulentní proudění jsou dráhy částic kapaliny neuspořádané, chaotické, čímž dochází k intenzivnímu promíchávání objemu proudící kapaliny.

Tento turbulentní charakter proudění temperační kapaliny přispívá k intenzivnějšímu přestupu tepla z formy do temperačního systému. Pro intenzivní chlazení tlakové slévárenské formy je nutné vždy zajistit turbulentní proudění kapaliny v temperačních kanálech. Pro intenzivní chlazení formy je důležitý průřez temperačního kanálu a vzdálenost mezi povrchem tvarové dutiny a jeho středem.

b) množství tepla předaného sáláním z formy do okolního prostředí $Q_{sál}$ lze stanovit:

$$Q_{sál} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{sp}^4 - T_{ok}^4) \cdot S \cdot t_{cykl} \quad (8)$$

kde σ - Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W.m}^2\text{.K}^{-4}\text{)]}$,
 ε - poměrná sálavost (0,7 až 0,99),
 T_{sp} - teplota povrchu sálajícího tělesa [K],
 S - plocha styku formy s okolím [m²],
 t_{cykl} - doba cyklu [s].

c) množství tepla odvedeného ze slévárenské formy prouděním Q_{pr} lze stanovit:

$$Q_{pr} = \alpha_k \cdot (T_{sp} - T_o) \cdot S \cdot t_{cykl} \quad (9)$$

kde α_k - součinitel přestupu tepla prouděním [W.m⁻².K⁻¹].

Při volném proudění vzduchu kolem formy ve vertikálním směru se uvádí empirický vztah pro stanovení součinitele prostupu tepla sáláním :

$\alpha_k = 1,77 \cdot (T_{sp} - T_o)^{1/4}$. Množství tepla odvedeného prouděním je relativně nízké, u tlakového lití činí 5 až 10 % z celkového uvolněného tepla odlitku.

d) množství tepla z formy do rámu tlakového lícího stroje Q_{str} je přímo úměrné teplotnímu spádu, času a průtokové ploše kolmé na směr teplotního toku:

$$Q_{str} = \alpha_v \cdot (T_{sp} - T_o) \cdot S_v \cdot t_{cykl} \quad (10)$$

kde S_v - povrch styku formy s rámem stroje [m²],
 α_v - součinitel přestupu tepla vedením [W.m⁻².K⁻¹].

e) množství tepla odvedeného z formy nástřikem Q_{on} lze stanovit:

$$Q_n = m_k \cdot [c_n \cdot (T_v - T_{np}) + L_{vn}] \quad (11)$$

kde m_k - hmotnost nástřiku [kg]
 c_n - měrnou tepelnou kapacitu nástřiku [J.kg⁻¹.K⁻¹]

T_v – teplotu vypařování kapalně fáze nástřiku [°C];

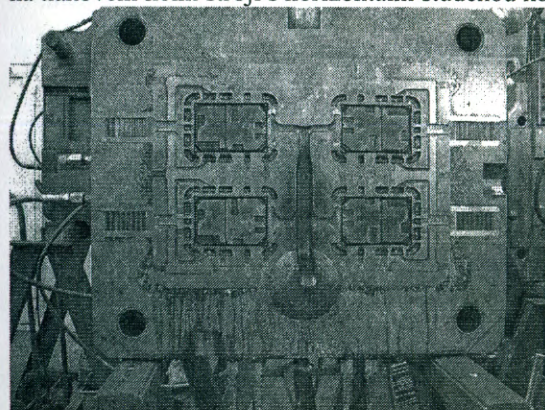
T_{np} – počáteční teplotu nástřiku [°C];

L_{vn} – měrné skupenské teplo vypařování nástřiku [J.kg⁻¹].

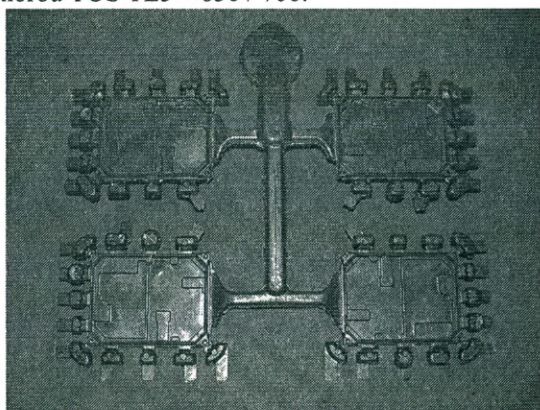
EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ TEPELNÉ BILANCE PŘI TLAKOVÉM LITÍ

Výpočty tepelné bilance byly provedeny na dvoudílné tlakové formě pro výrobu hliníkových odlitků jednoduchého deskovitého tvaru, viz obr. 4. Při volbě tlakové formy bylo bráno v úvahu takové konstrukční řešení, které by zamezilo zkreslování hodnot během experimentálního měření. Forma je sestavena z tvarových vložek (materiál Dievar X35CrMoV5-2) a opatřena samostatně regulovatelným okruhem termoregulačního zařízení Thermobiehl.

Pro výrobu odlitků je používána slitina EN AC-47100 (EN AC Al Si12Cu1(Fe)), odlévána na tlakovém licím stroji s horizontální studenou komorou TOS TL5 – 630 / 700.



Obr. 4 Část formy



Obr. 5 Výstřik z tlakové formy

Tab. 2 Vypočítané hodnoty složek tepel při tepelné bilanci slévárenské formy

Přehled hodnot složek tepla tepelné bilance tlakové formy		
Celkové teplo uvolněné odlitkem včetně vtokové soustavy a tablety	$Q = Q_{pr} + Q_{kr} + Q_{tch}$	$1,046 \cdot 10^6$ [J]
Celkové množství tepla předaného do okolí sáláním	$Q_{sál}$	$1,212 \cdot 10^5$ [J]
Celkové množství tepla odvedeného prouděním do okolí	Q_{pr}	$4,699 \cdot 10^4$ [J]
Celkové množství tepla odvedené do rámu stroje vedením	Q_{str}	$6,308 \cdot 10^4$ [J]
Celkové množství tepla odvedené nástřikem líce formy	Q_{on}	$1,106 \cdot 10^6$ [J]
Celkové množství tepla odvedené temperačním systémem	Q_{ch}	$-3,078 \cdot 10^5$ [J]
Celkové množství tepla odvedeného z tlakové formy jednotlivými složkami	$Q_{sál} + Q_{pr} + Q_{str} + Q_{on} + Q_{ch}$	$1,029 \cdot 10^6$ [J]

Poznámka: Rozdíl výsledků je způsoben zanedbáním hodnoty tepla, které je odvedeno pístem stroje a současně možnými nepřesnostmi při experimentálním stanovení teplot.

ZÁVĚR

Stanovená tepelná bilance tlakového litého ukazuje význam nejen temperačního systému pro zachování konstantních podmínek teplotního pole formy, ale také vliv nástřiku líce formy. Ze získaných výsledků měření a výpočtů tepelné bilance tlakové lité formy byly zjištěny tyto skutečnosti:

- a) Nejvíce tepla je odvedeno ze systému nástřikem, což je způsobeno vysokým měrným skupenským teplem vypařování vody z nástřiku. Tato hodnota činí $1,106 \cdot 10^6$ [J], což je 114% z celkového tepla, které uvolní tlakový výstřik.
- b) Teplo odvedené temperačním systémem tlakové lité formy činí $-3,078 \cdot 10^5$ [J]. Tato záporná hodnota ukazuje, že ve skutečnosti je v tomto případě nutné do systému teplo přivést. Tato skutečnost může být způsobena teplem odvedeným vypařováním nástřiku, nebo nevhodným rozmístěním temperačních kanálů ve formě.
- c) Tepla odvedená do okolí sáláním a prouděním jsou poměrně malá. Teplo odvedené do okolí sáláním činí 9,5% z celkového tepla uvolněného odlitkem a je zhruba o třetinu větší než teplo předané do okolí prouděním, které činí 3,9% z celkového tepla uvolněného odlitkem.

Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4674788501

LITERATURA

- [1] NOVÁ, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách. TU v Liberci, 2002.
- [2] BRUNNHUBER, E., HASSE, S., a kol.: Warmetechnische auslegung von druckgiessformen. TZ Arge Metallguss, 1999.
- [3] ZOLINER, O.: Optimised mould temperature control. Bayer AG, 1997.
- [4] LENFELD, P.: Teplotní pole ve vstřikovacích formách. Disertační práce, TU v Liberci, 1997.
- [5] DRÁBEK, M.: Teplotní režim tlakové lité formy při odlévání slitin hliníku na bázi Al-Si. Diplomová práce, TU v Liberci 2005.

Recenzoval: Prof. Ing. František Havlíček, CSc.